

◆ 특집 ◆ 직선·회전모터 구동 이송·회전체 연구 III

복합소재를 사용한 직선모터용 경량이송테이블 개발

Development of Lightweight Moving Table for Linear Motor using Composite Materials

황영국¹, 은인웅², 이춘만^{1,✉}, 서용원³
 Young-Kug Hwang¹, In-Ung Eun², Choon-Man Lee^{1,✉} and Yong-Won Seo³

¹ 창원대학교 기계설계공학과 (Department of Mechanical Design and Manufacturing Engineering, Changwon National Univ.)

² 경기공업대학 금형설계과 (Department of Die and Mold Design, Kyonggi Institute of Technology)

³ 창원대학교 화학시스템공학과 (Department of Chemical Engineering, Changwon National Univ.)

✉ Corresponding author: cmlee@changwon.ac.kr, Tel: 055-213-3622

Manuscript received: 2010.1.1 / Revised: 2010.2.17 / Accepted: 2010.2.19

Linear motors are efficient mechanism that offers high speed and positioning accuracy. By eliminating mechanical transmission mechanisms, much higher speeds and greater acceleration can be achieved without backlash or excessive friction. However, an important disadvantage of linear motor system is its high power loss and heating up of motor and neighboring machine components on operation. Therefore, it is necessary to design moving table with high stiffness, high efficiency and light weight construction. This paper presents the development of moving table using composite material. In order to develop light weight construction of moving table, finite element analysis is performed to find best moving table construction and composite stacking sequence. NASTRAN and MINITAB were used as the optimizer. A prototype for the moving table using composite material was created.

Key Words: Linear Motor (직선모터), Moving Table (이송테이블), Composite Materials (복합소재), Lightweight Structure (경량화 구조), Stacking Sequence (적층 순서)

1. 서론

오늘날 리니어모터 시스템은 리니어모터가 가지는 고속성, 고정밀성, 비접촉성, 정숙성 등의 장점으로 인해 반도체 장비, 수송 기기, 자동화 기기, 공작기계 등 직선 운동 기구가 필요한 대부분의 산업 분야에서 사용되고 있다. 리니어모터가 가지는 이러한 특성을 효과적으로 활용하기 위해서는 리니어모터 자체의 성능향상과 함께 이동부의 경량화설계, 가동자와 고정자 사이에 작용하는 자기 흡인력에 따른 굽힘 변형을 최소화하는 기술, 모터의 발열에 따른 효과적인 냉각기술, 공기간극과

영구자석에 이물질의 침입을 막는 방진대책 등 복합적인 기술이 필요하다.¹

리니어모터 시스템에서 이송테이블은 고정자와 이동자 사이에서 발생하는 큰 자기 흡인력을 지지할 수 있는 강성을 가지면서 가, 감속 특성의 향상을 위해 경량일수록 유리하다. 또한 관성 크로스 토크 현상의 억제를 위해 질량중심과 구동점 사이의 거리가 가까운 저중심 설계에 유리한 구조를 가져야 한다. 이러한 요구들로 인해 최근에는 구조 재료적 장점을 가진 복합소재를 구조 경량화를 위한 부품에 많이 적용하고 있고, 관련 연구가 활발히 이루어지고 있다.

복합소재는 두 종류 이상의 소재를 조합하여 물리적, 화학적으로 원래의 원소와 상이한 상을 형성하여 원래의 소재보다도 우수한 기능과 특성을 발휘하도록 설계된 재료로 기존의 금속재료에 비해 높은 비강도와 비강성을 갖고 진동감쇠특성과 피로특성 등이 우수하다. 또한, 이들 특성을 섬유방향과 적층순서를 조절함으로써 사용자의 요구조건에 적합한 구조요소로 제작할 수 있다는 장점 때문에 구조의 경량화를 추구하는 제품에 많이 적용되고 있다.²

복합소재 구조물의 설계는 주어진 하중조건, 환경적 조건 등에 대해서 사용자의 요구조건을 만족하는 층수와 적층각을 결정하고 그 다음으로 적층순서를 결정한다. 원하는 강성, 강도 및 구조 안정성 조건을 모두 만족하는 최적의 적층순서는 존재하지 않는다. 따라서 설계의 요구조건에 따른 최적의 층수, 적층각, 적층순서를 결정하기 위해서는 각 설계 조건에 합당한 설계규칙을 따르고 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 특성을 사전에 확인하는 것이 중요하다.³

본 연구에서는 개발된 리니어모터 시스템에서 기존의 강 소재 이송테이블을 복합소재 이송테이블로 변경하여 이송테이블을 경량화시키고자 한다. 이를 위해 리니어모터용 이송테이블의 복합소재 적용을 위한 타당성을 검토하고, 복합적층판의 설계를 위해 유한요소해석을 이용하여 적층각의 변화에 따른 변위와 응력을 분석하여 최적의 적층각을 결정하였다. 결정된 적층각에서 원하는 설계기준을 만족시킬 수 있는 최적의 적층수와 프리프레그(prepreg)의 혼합비율을 반응표면법을 이용하여 도출하였다. 유한요소해석을 통하여 도출된 복합적층판 설계 안을 바탕으로 복합소재 이송테이블 시제품을 제작하였다.

2. 복합소재 이송테이블 설계

2.1 이송테이블 구조

본 연구에서는 최대추력 4,000N, 가속도 3G 를 목표로 설계된 영구자석형 동기식 리니어모터에서 기존의 기계구조용 강으로 제작된 이송테이블을 대신하여 복합소재 이송테이블을 적용해 보고자 한다. Fig. 1 은 적용하고자 하는 리니어모터 시스템의 사진이다.

리니어모터용 이송테이블에 복합소재를 적용하기 위해 고려해야 하는 설계조건으로는 가동자와

고정자 사이에 작용하는 자기흡인력에 따른 굽힘 변형을 최소화 할 수 있는 강성문제, LM 블록 등과의 기계적 결합을 위한 가공문제와 노치부의 응력집중에 의한 강도문제, 이물질 침입을 막는 방진대책, 열적 안정성 문제 등 여러 가지가 있다.



Fig. 1 Product of linear motor system

CFRP(carbon fiber-reinforced polymer)와 같은 섬유/수지 복합소재의 경우 표면에 미세한 입자들이 발생할 수 있고, 흡습성, 열충격, 광선에 의한 열화, 외부 충격에 의한 표면 손상 등에 약하다. 따라서 리니어모터 시스템에 바로 적용할 경우 이물질 혼입 위험 및 외부 충격에 의한 표면 손상 등의 문제가 발생할 수 있다. 따라서 수지를 기지재로 사용한 복합소재를 리니어모터용 이송테이블에 바로 적용하기에는 문제가 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 상기와 같은 문제점을 보완하여 리니어모터에 적용하기 위해 Fig. 2 와 같은 두 종류 이상의 강화재를 이용한 하이브리드형식의 복합소재를 고려하였다.^{4,5}

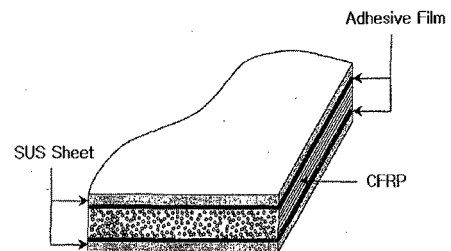


Fig. 2 Schematic illustration of hybrid laminates

2.2 유한요소해석을 통한 적층판 설계

2.2.1 적층각 결정

유한요소해석을 이용하여 복합적층판의 설계안을 도출하기 위해 적층각의 변화에 대한 이송테이블의 변위와 응력을 분석하였다. 이때 복합적층

판의 형태는 미세한 입자들에 의한 방진문제, 충격손상 등의 문제를 해결하기 위해 3mm 두께의 SUS 판재를 CFRP 상면과 하면에 붙인 Fig. 2 에 나타난 하이브리드형식의 복합소재에 대해 고려하였다.

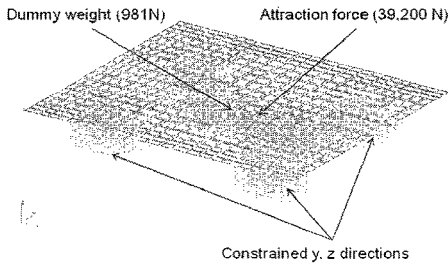


Fig. 3 FE-model of the moving table

Table 1 Mechanical properties of prepreg

	USN 175BX	URN 300B
Ply thickness [mm]	0.17	0.25
Young's modulus [GPa]	E ₁₁	131
	E ₂₂	8.2
Poisson's ratio	0.28	0.28
Shear modulus [GPa]	G ₁₂	4.5
	G ₁₃	4.5
	G ₂₃	3.5
Density [kg/mm ³]	1,580	1,580

Table 2 Mechanical properties of SUS 304

Ply thickness [mm]	3
Young's modulus [GPa]	200
Poisson's ratio	0.29
Shear modulus [GPa]	86
Density [kg/mm ³]	2,869

해석을 위해 이송테이블, 가동자, LM 블록 부분만을 단순화하여 모델링 하였다. 경계조건으로는 LM 블록 부분을 완전 구속시켰으며 가동자 부분에 39,200N 의 자기 흡인력을 적용하였으며, 이송테이블 중앙에 100kgf 무게의 작업물이 놓여 있다고 가정하였다.⁵ Fig. 3 은 해석모델을 나타내고 있다.

Table 1, 2 는 해석 모델에 사용된 물성치를 나타내고 있다.

일반적으로 복합소재 구조물의 설계 시 적층각과 두께 등은 연속적인 설계변수로 취급되어 왔다. 그러나 실제 복합소재 구조물의 설계나 제작 시 사용되는 적층각은 0°, 90°, ±30°, ±45° ±60° 등과 같이 이산화된 적층각으로 제한되는 경우가 많고, 두께 역시 각 재료에 따라 정해져 있다. 그러므로 연속적인 설계변수에 근거한 설계는 실제 문제에 적용하기 어려운 경우가 많다. 따라서 실제적인 설계를 위해서는 이산화된 설계변수를 이용하는 것이 바람직하다.

본 연구에서는 복합적층판의 설계에 대한 검토를 위해 이용하는 적층각을 0°, 90° 및 ±45° 로 두고 고찰해 보았다. Table 3 은 해석조건을 나타내고 있다. 적층각의 영향만을 고려하기 위해 적층 두께는 모든 경우에 28.88mm(URN 300B 64ply + USN175BX 48ply + SUS 304 2ply)로 동일하게 두었다.

Table 3 Analysis conditions

	Stacking sequence
Case 1	[0 90 0 90] _{14s}
Case 2	[45 -45 45 -45] _{14s}
Case 3	[0 -45 90 45] _{14s}

Table 4 Results of FEM

	Case 1	Case 2	Case 3
Max. displacement [mm]	0.0577	0.0560	0.0565
Von Mises stress [MPa]	14.7	14.7	15.7

Table 4 는 세 가지 경우에 대한 해석결과를 나타내고 있다. 해석결과 동일한 층수에 대해 변위 측면에서는 경우(case) 2 가 가장 좋게 나타났고, 그 다음 경우 3, 경우 1 순으로 나타났다. 응력측면에서는 경우 1, 2 가 경우 3 에 비해 우수한 것으로 나타났다. 전체적으로 강성과 강도측면에서 경우 2 의 적층각이 가장 좋은 것으로 나타났다. 하지만 자기흡인력에 대한 공극 유지 측면에서 중요한 강성설계 측면에서는 경우 3 의 경우와 그 차이는 미미한 것으로 나타났다.

준등방성 적층패턴으로 복합소재 평판을 제작하였을 경우 섬유 평면 내에서 인장, 압축, 전단하중 등 모든 하중 상태에서 좋다. 리니어모터용 이

송테이블의 경우 테이블에 작용되는 하중 방향이 고정되어져 있지 않는 임의의 복합하중을 받는 경우가 많다. 따라서 이 경우 강성설계 측면에서 유사한 성능을 나타낸다면 준등방성 적층패턴이 더욱 유리할 것이다. 경우 3 의 경우 준등방성 적층패턴이면서 경우 2 와 유사한 변형량을 보임으로 복합하중을 받는 리니어모터용 이송테이블에서는 경우 2 에 비해 더욱 적합할 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 준등방성 적층패턴인 경우 3 을 적층각으로 선택하였다.

2.2.2 적층수 결정

본 절에서는 앞선 절에서 결정된 적층각을 이용하여 설계제한 조건을 만족시키는 최적의 적층수를 도출하고자 한다.

최적의 적층수를 도출하기 위해서는 우선 설계 제한조건을 파악하여야 한다. 이를 위해 기존에 사용된 30mm 두께의 강 소재 이송테이블에 대한 구조해석을 수행하여 변형량을 파악하였다. 구속 조건 및 하중조건은 앞선 2.2.1 절의 해석조건과 동일하게 적용하였다.

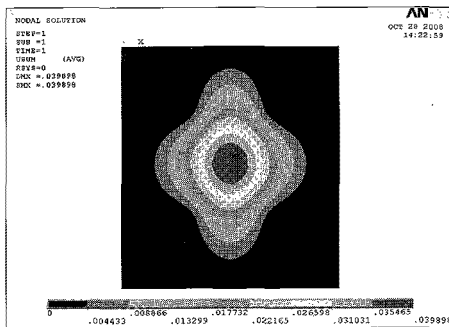


Fig. 4 Deformation result by FEM

Fig. 4 는 변형량 해석결과를 보여주고 있다. 해석결과 최대변형량 39.9 μm 가 발생하였다. 이에 설계여유를 고려하고 리니어모터 시스템의 성능을 위해 유지해야 하는 가동자와 고정자 사이의 공극을 제조업체와 협의하여 최대변형량 60 μm 이하를 최적의 적층수를 찾기 위한 설계제한조건으로 선정하였다. 또한, 이송테이블의 두께가 클 경우 이송테이블의 질량중심과 리니어모터의 구동점 사이의 거리가 증가하여 리니어모터 시스템의 성능에 악영향을 줄 수 있다. 이에 이송테이블의 최대 두께를 기존과 동일한 30mm 로 제한하였다.

설계제한조건을 만족시키는 최적의 적층수를 찾기 위해 상용프로그램인 MINITAB 을 이용하여 실험계획을 수립하고, 실험계획에 따라 전산실험을 수행하였다.

실험배치를 위해 반응표면 실험방법을 사용하였다. 이 방법은 반응변수와 설명변수들 사이의 관계를 실험이나 시뮬레이션을 통하여 다항식으로 구한 다음 반응변수의 값을 최대 또는 최소로 하는 설명변수들의 수준조합을 찾아내는 것으로서 통계적으로 어떤 특성을 최적화하는 방법의 일종이다.

실험변수는 적층수에 따른 적층두께와 일반강성과 고강성 프리프레그의 혼합비율을 선정하였다. 고강성 프리프레그의 경우 일반강성 프리프레그에 비해 기계적 성질이 좋으나 원가가 비싸다. 이에 설계 제한조건을 만족시키면서 최소의 비용으로 제작하기 위해 고강성에 대한 일반강성 프리프레그의 혼합비율을 인자로 선정하였다.

Table 5 Computational experiment plan

Run order	Stacking thickness [mm]	USN 175/ URN 300
1	24.24	3
2	21.52	2.33
3	23.52	1.75
4	23.52	1.75
5	30.96	2.2
6	29.51	1
7	23.52	1.75
8	31.6	1.67
9	19.44	1
10	26.8	0.714
11	23.52	1.75
12	18.8	1.68
13	23.52	1.75

상용프로그램인 MINITAB 을 사용한 실험배치에서 수준의 최소값과 최대값을 지정하면 실험을 수행해야 할 수준이 계산된다. 하지만 복합소재의 경우 사용되는 프리프레그의 두께가 Table 1 과 같이 결정되고, 적층수를 정수로 배치해야 하므로 정확하게 그 값을 따를 수 없게 된다. 이에 본 연구에서는 배치된 실험값에 가장 유사하게 제조 가능한 두께를 기준으로 실험을 재배치 하였다.

실험배치를 위해 적층두께는 최소값 20mm, 최대값 30mm 으로 하였으며, 혼합비율은 최소값 1, 최대값 2.5 로 지정하였다. Table 5 는 반응표면실험에 사용된 실험배치를 나타내고 있다.

실험 결과를 이용하여 반응표면 모형을 구축한 후, 모형 적합(model fitting)을 이용하여 반응 값에 대한 2 차 다항 모형의 추정식을 구하였다.

반응표면 모형의 구축 및 회귀식 추정을 위해 모든 인자에 대한 반응표면 형태를 고려하는 완전 이차형으로 예측모형을 설정하여 구한 후 잔차분석과 결정계수(coefficient of determination)를 이용하여 선택한 회귀모형의 적합여부를 판정하였다. 선택한 모형이 적합하지 않을 경우는 분산분석표에서 유의하지 않은 항들을 풀링(pooling)시키는 반응표면 모형 축소를 통하여 모형을 다시 구축하고 최종적으로 회귀모형을 추정하였다.

변위에 대한 반응표면 모형을 추정한 결과 결정계수(R²_adj) 값이 99.8%로 응답변수에 대해서 정밀한 근사모형이 구해졌다.

Table 6 에 유한요소해석을 통한 전산실험값과 반응표면 모형을 통한 추정값을 비교하여 나타내었다. 비교결과 최대오차 4.8% 이내에서 일치하는 것으로 나타나 이 모델을 사용하는데 문제가 없는 것으로 판단된다.

Table 6 Comparison results of the FEM and RSM

Run order	Max. deformation results [mm]		Error [%]
	FEM	RSM	
1	0.0766	0.075	2.1
2	0.0899	0.088	2.2
3	0.0784	0.077	1.8
4	0.0784	0.077	1.8
5	0.0544	0.052	4.6
6	0.0562	0.054	4.1
7	0.0784	0.077	1.8
8	0.0524	0.050	4.8
9	0.101	0.099	2.0
10	0.0632	0.062	1.9
11	0.0784	0.077	1.8
12	0.105	0.104	1.0
13	0.0784	0.077	1.8

고려한 설계변수에 대한 목적함수를 나타내는 2 차 다항식을 최소자승법을 이용하여 구하면 식 (1)과 같다.

$$\delta_y = 0.3006 - 0.0143T + 0.0012R + 0.0002T^2 \quad (1)$$

여기서 T 는 mm 로 표시되는 적층두께이며, R 은 고강성에 대한 일반강성 프리프레그의 혼합비율을 나타낸다.

추정한 회귀모형을 이용하여 복합소재를 적용한 이송테이블에서 원하는 설계조건을 만족시킬 수 있는 설계변수의 조합을 구하고, 각각의 설계변수들이 목적함수에 미치는 영향을 분석하였다.

Fig. 5 는 추정한 회귀식을 바탕으로 각각의 설계변수들이 목적함수에 미치는 영향의 정도를 그래프로 나타낸 것이다. 이 그래프에서는 교호작용에 의한 영향을 배제하고 분석하였다.

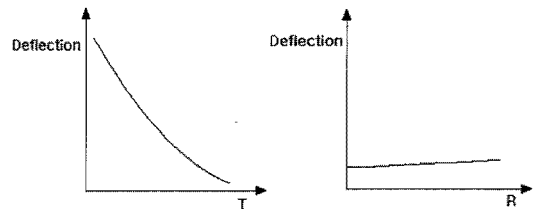


Fig. 5 Effect plots for deflection

분석결과 변형량에는 적층수가 크게 영향을 미치고, 일반강성과 고강성 프리프레그의 혼합비율은 적층수에 비해 상대적으로 작은 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Fig. 6 은 응답변수가 특정 범위 이내로 들어가는 설계변수들의 범위를 구한 Overlaid plot 을 나타낸 것이다. 적층두께와 혼합비율이 변할 때 변형량 50~60 μm 범위를 만족하는 설계변수들의 범위를 나타내고 있다.

해석결과 본 연구에서 고려한 해석조건외의 범위 이내에서 변형량 60 μm이하를 만족시키는 설계변수의 조합을 얻을 수 있었다. 적층두께가 동일할 경우 고강성 프리프레그의 혼합비율을 25%에서 59%로 늘리면 변형량 개선효과가 5%정도 발생하는 것으로 나타났다. 이는 고강성 프리프레그를 사용함으로써 인해 발생하는 가격상승에 비해 그 개선효과가 크지 않은 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 고강성 프리프레그의 혼합비율을 25%로

선정하고, 일반강성 프리프레그의 적층수를 늘리는 방향으로 설계 안을 결정하였다.

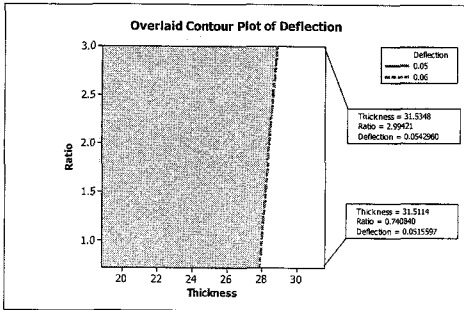


Fig. 6 Overlaid contour plot for deflection

3. 복합소재 이송테이블 제작

2 장에서 도출한 복합소재 이송테이블 설계 안을 바탕으로 실제 제작을 수행하였다.

제작을 위한 하이브리드형식의 이송테이블 적층패턴은 Fig. 7 과 같다.

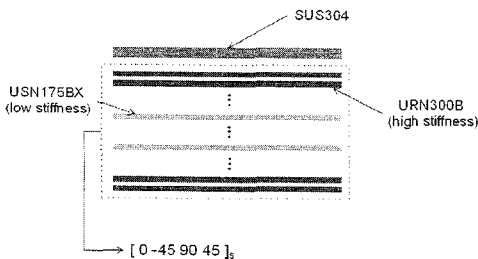
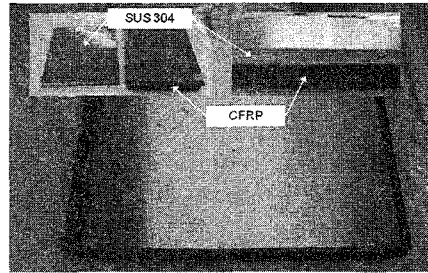


Fig. 7 Stacking pattern for the linear motor moving table

일반강성 프리프레그를 안쪽에 배치하고 고강성 프리프레그를 바깥쪽에 배치하였다. 이송테이블의 하면에는 SUS 판을 제거하였다. 초기 개념설계 단계에서는 복합소재에서 발생할 수 있는 미세한 입자가 리니어모터에 미치는 영향을 배제하기 위해서 이송테이블 하면에도 SUS 판을 부착하는 방향으로 설계하였다. 하지만 개발과정에서 복합소재 전문 업체의 경험상 그 발생 정도가 미미하고, SUS 판을 부착할 경우 리니어모터 가동자, LM 블록과의 조립을 위한 가공정도를 맞추기 위해서는 가공비용이 크게 상승하여 하부 SUS 판을 제거하였다. 또한, 해석결과 SUS 판의 부착으로 인한 이송테이블 강성개선효과가 크지 않아 SUS 판을 제거하고 그 두께만큼 일반강성 프리프레그의 적

층수를 늘리는 것이 유리하다고 판단하였다.

Fig. 8 은 복합소재 이송테이블 제작공정을 보여주고 있다. Fig. 8(a)는 SUS 판과 CFRP 가 접착필름(FM73)에 의해 부착된 상태를 보여주고, Fig. 8(b)는 테이블 상면의 가공정도를 맞추기 위해 정삭공정이 끝난 후의 사진을 보여주고 있다.



(a)



(b)

Fig. 8 Photo of the manufactured moving table: (a) before finishing process; (b) after finishing process

공작기계용 이송테이블의 경우 통상 상다듬질 이상의 표면거칠기 정밀도를 만족하여야 한다. 일반적으로 정삭가공을 통해서만 중다듬질 정도까지 가능하므로 정삭가공 후 연삭가공을 통해 상다듬질 이상의 표면거칠기 정밀도를 만족시킨다.

제작과정에서 정삭가공 공정까지는 CFRP 와 SUS 판의 분리 현상이 발생되지 않았으나 연삭가공 공정에서 분리현상이 발생하였다. 이는 제작하고자 하는 이송테이블의 경우 연삭가공을 수행하기 위한 클램핑이 용이하지 않고, 연삭가공의 경우 절삭가공과는 달리 연삭열의 대부분이 피삭재로 전달되어 전달된 열에 의해 SUS 판과 CFRP 사이에 큰 열응력이 발생하기 때문으로 판단된다.

연삭공정에서 SUS 판과 CFRP 판의 분리현상을 해결하기 위해 이송테이블 성능에 영향을 미치지 않는 부위에 별도의 구멍을 가공하여 클램핑 하였으며 여러 번의 연삭가공을 통해 판의 분리없이

연삭가능한 최적조건을 도출하였다.

도출된 조건을 이용하여 이송테이블을 다시 제작한 결과 판사이의 분리 문제를 해결하였다. Fig. 9 는 최종적으로 제작된 복합소재 적용 이송테이블을 보여주고 있다.

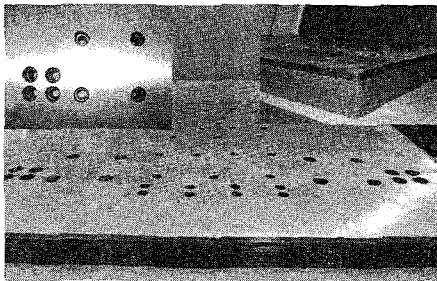


Fig. 9 Photo of the manufactured moving table after grinding process

복합소재를 사용하여 제작된 이송테이블의 경우 무게가 약 57kgf 으로 측정되었다. 이는 기존 강 소재 이송테이블의 무게(137kgf)보다 약 58% 정도 감소된 무게이다. 복합소재를 사용함으로써 기존의 강 소재 이송테이블과 유사한 강성을 가지면서도 충분한 중량 감소 효과를 얻을 수 있었다.

4. 결론

리니어모터 시스템에서 이송테이블의 경량화를 위해 기존의 강 소재 이송테이블을 복합소재 이송테이블로 변경하고자 하였다. 복합소재를 사용한 이송테이블의 설계를 위해 리니어모터 시스템에서 복합소재 적용을 위해 고려해야 할 사항을 검토하고, 복합적층판의 설계를 위해 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석을 통한 설계 안을 바탕으로 실제 시제품을 제작하였다. 본 연구를 통해 다음의 결론을 도출하였다.

1) 리니어모터 시스템의 이송테이블을 복합소재로 적용할 경우 방진, 표면 충격 손상 등에 대한 영향으로 하이브리드형식의 복합소재가 적당할 것으로 판단된다.

2) 복합소재를 사용하여 이송테이블을 제작할 경우 [0 -45 90 45]의 준등방성 적층패턴이 가장 적합할 것으로 판단된다.

3) 이송테이블의 강성에는 적층수가 큰 영향을 미치며 일반강성과 고강성 프리프레그의 혼합비율은 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 제조

원가 측면에서 일반강성 프리프레그의 적층수를 늘리는 것이 유리할 것으로 판단된다.

4) 반응표면법을 이용하여 강성설계 측면에서 본 연구에서 고려한 리니어모터 시스템의 설계기준을 만족시킬 수 있는 적층수와 일반강성과 고강성 프리프레그의 혼합비율을 도출하였다.

5) 시제품 제작 과정 중 연삭공정에서 SUS 판과 CFRP 의 분리 현상이 발생하였으며 이를 해결할 수 있는 가공조건을 실험을 통하여 도출하였다. 시제품 제작결과 기존의 강 소재 이송테이블보다 약 58%의 무게를 줄일 수 있었다.

향후 복합소재 사용하여 제작된 이송테이블을 실제 리니어모터 시스템에 적용하여 성능향상 효과 및 문제점을 분석할 계획이다.

후 기

본 연구는 지식경제부 지방기술혁신사업(RTI04-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Hwang, Y. K., Lee, C. M. and Eun, I. U., "Performance improvement of a linear motors by structure optimization [1st paper]," Journal of the KSPE, Vol. 25, No. 5, pp. 7-14, 2008.
2. Lee, D. G., Jung, M. Y., Choi, J. H., Jeon, S. S. and Chang, S. H., "Composite materials," Hongrung Publishing Company, 2007.
3. Kim, J. S., "Stacking sequence optimization of composite laminates for railways using expert system," J. of Korean Society for Railway, Vol. 8, No. 5, pp. 411-418, 2005.
4. Lee, J. H. and Kim, Y. H., "Pre-treatment condition and curing method for fabrication of Al 7075/CFRP Laminates," Journal of the KSCM, Vol. 13, No. 2, pp. 42-53, 2000.
5. Hwang, Y. K., Lee, C. M., Eun, I. U. and An, S. B. "Design of linear motor moving table using composite materials," Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 11-12, 2008.